引用格式：施锡林，尉欣星，杨春和，等. 中国盐穴型战略石油储备库建设的问题及对策. 中国科学院院刊，2023, 38(1): 99-111, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20221014005.
Shi X L, Wei X X, Yang C H, et al. Problems and countermeasures for construction of China's salt cavern type strategic oil storage. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 99-111, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20221014005. (in Chinese)

中国盐穴型战略石油储备库建设的问题及对策

施锡林[1,2] 尉欣星[1,2] 杨春和[1,2] 马洪岭[1,2] 李银平[1,2,3*]

1 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071
2 中国科学院大学 工程科学学院 北京 100049
3 中国科学院武汉岩土力学研究所 环境岩土工程湖北省重点实验室 武汉 430071

摘要 石油是重要的战略能源，建立充足的石油储备是保障国家政治、经济和国防安全的重大需求。我国石油对外依存度已连续3年超过70%，并且石油储备量也极低。地下盐穴是国际公认的石油大规模储备的优良场所，欧美发达国家在20世纪已建成多个盐穴储油库群，建设盐穴储油有望成为破解我国石油危机的有效途径。文章调研了国外盐穴储油现状，揭示了我国战略石油储备存在的问题，分析了我国盐穴储油的技术、资源和交通等优势条件，提出了我国建设盐穴型战略石油储备的建议。研究表明，我国石油输运管道发达、盐穴储油技术储备充足、工程经验丰富，且建库所需的盐矿地质资源充足，可以在短期内建成大规模盐穴型战略石油储备库。

关键词 能源，战略石油，盐穴储油库，问题，对策

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20221014005

2022年俄乌冲突爆发后，石油设施成为交战国的重要打击目标。国际油价受战争的影响，一度突破138美元/桶，创14年来新高，进一步导致欧美国家通货膨胀加剧。西方国家已建立较完备的石油储备体系，在关键时期或市场动荡时期，可动用石油储备来平抑市场价格，缓解石油供需紧张现状。目前，我国石油对外依存与日俱增，已连续3年超过70%（图1）[1]。因此，亟须建立大规模战略石油储备。

此外，国际石油价格波动明显（图2）[2]。石油价格大幅波动严重危害经济安全、影响社会稳定。因此，建立国家战略石油储备，对改善能源结构、稳定

*通信作者

资助项目：国家优秀青年科学基金（52122403），中国科学院战略性先导科技专项（B类）培育项目（XDPB21），中国科学院青年创新促进会人才项目（2019324）

修改稿收到日期：2022年11月20日；预出版日期：2022年12月13日

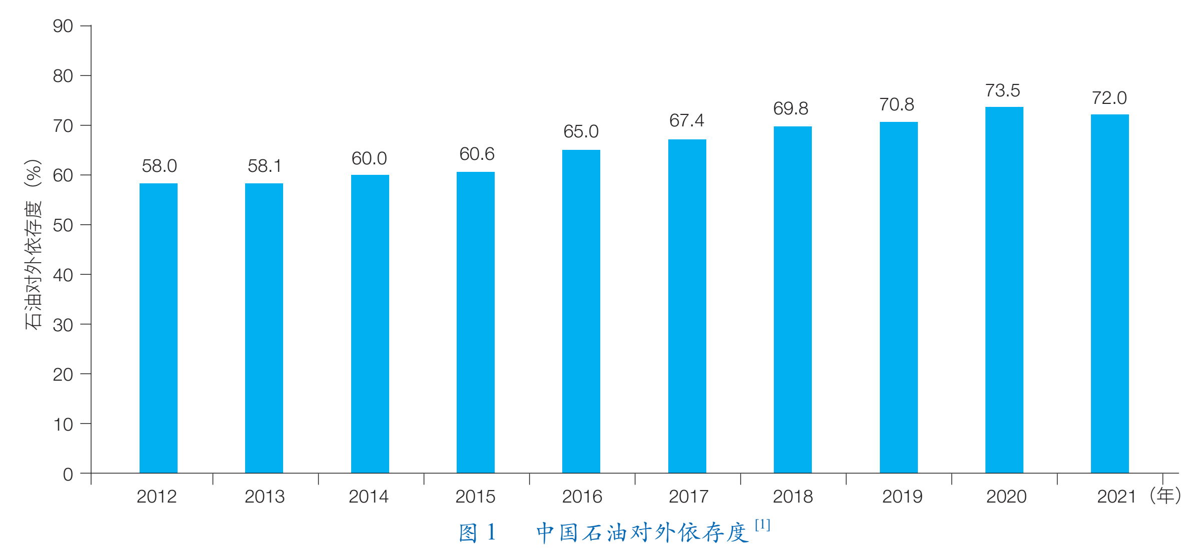


图 1　中国石油对外依存度[1]

Figure 1　Outer dependency for oil of China[1]

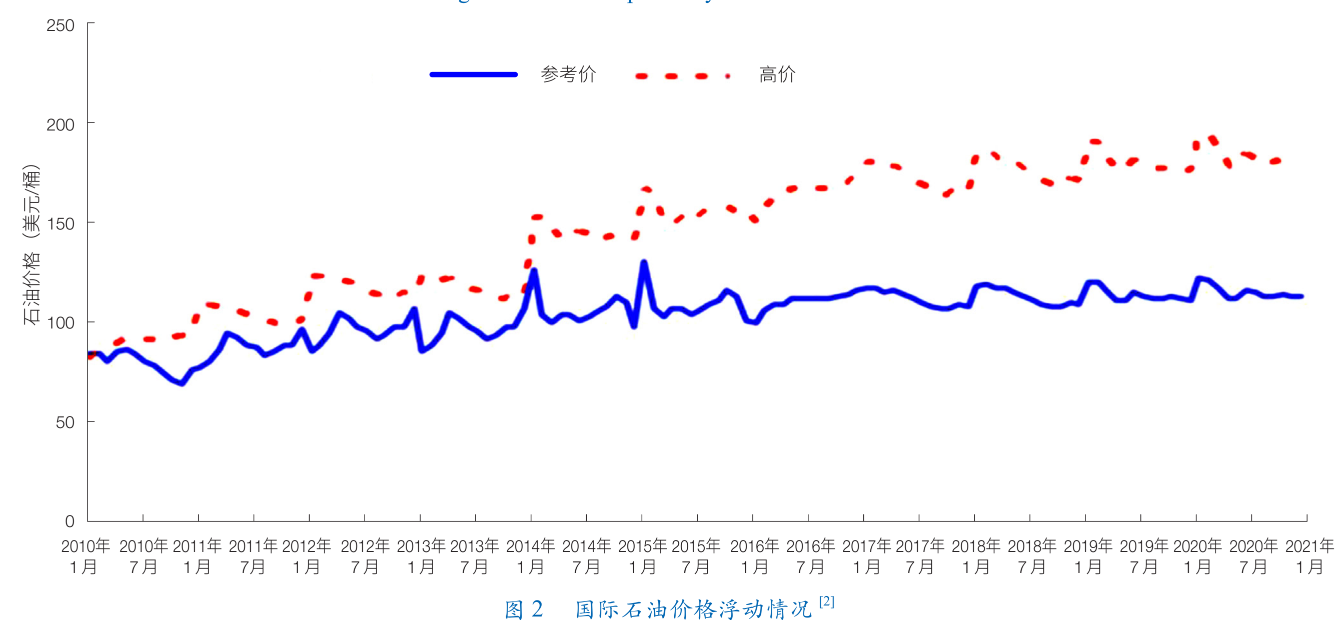


图 2　国际石油价格浮动情况[2]

Figure 2　International oil price fluctuation[2]

国民经济、维护国家安全，具有重大的战略意义。

盐穴是国际公认的地下石油储备的优良场所，在石油存储中占据重要地位。国外发达国家已建立大规模石油盐穴储备库（图 3）[3]。例如，美国已建立 60 多个储油库，储油规模达 7.2×10^8 桶，储油体积为 1.1×10^8 立方米[3]。

文章结合国外盐穴战略储油发展历程，分析地下盐穴储油的优势，对我国盐穴战略储油的“卡脖子”问题进行探索，并基于我国盐矿赋存特征和盐穴天然气储库建设经验，探讨我国盐穴储油的总体可行性，提出中国盐穴战略石油储备的相关建议。

1 地下盐穴石油储备的优势

1.1 技术优势

地下盐穴储油技术采用卤水置换原理，运行过程中，注油管注入石油，排卤管排出卤水，实现对石油的存储；排卤管注入卤水，采油管采出石油，实现对石油的利用（图 4）。相比于其他存储方式，盐穴储油的成本低、密封性好、不易破坏、不易渗漏、风险低，是一种较好的地下存储方式（表 1）。

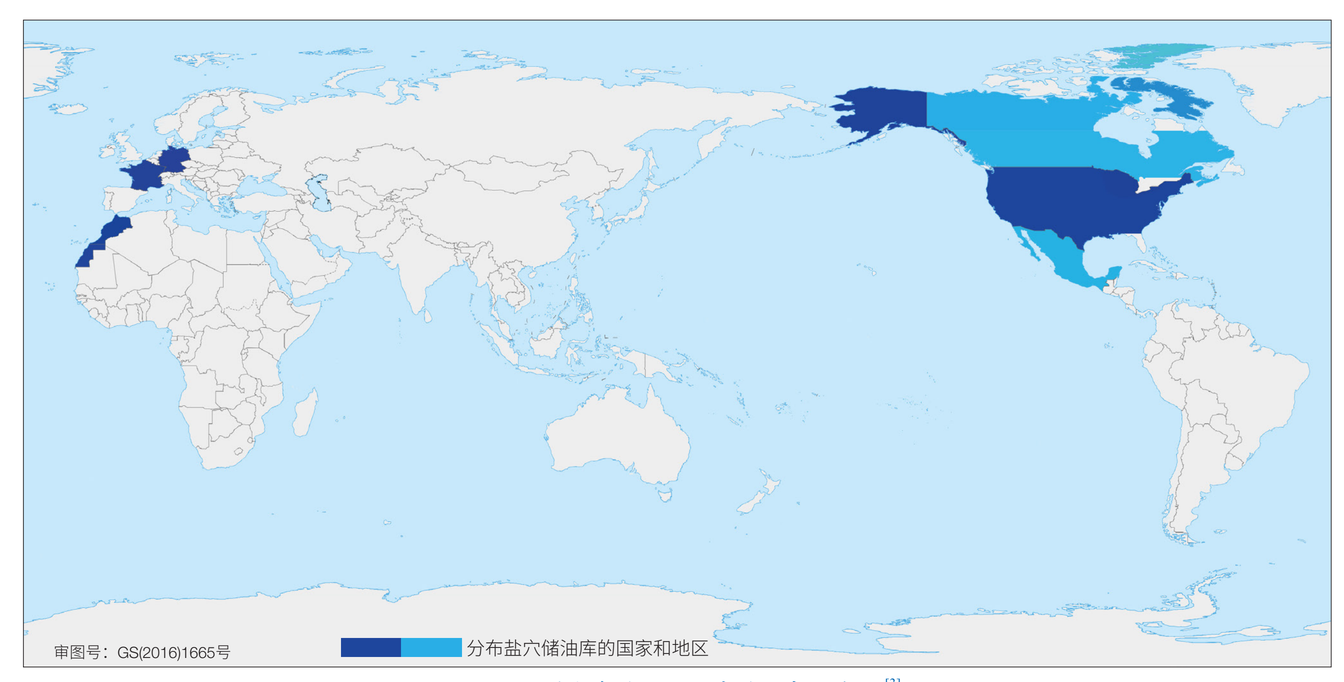


图 3　世界分布盐穴储油库的国家和地区 [3]

Figure 3　Countries and regions with salt caverns oil storage in the world[3]

1.2 规模优势

一座盐穴储油库群通常由数十个盐穴组成，单个盐穴储油能力一般为十几万到一百多万立方米，整个储油库群规模可达数百万到数千万立方米，如美国墨西哥湾的盐穴储油库群储油能力高达 1.1×10^8立方米 [3]。因此，相比于地面储罐等储备形式而言，盐穴储备规模巨大，非常适合国家战略石油储备。

1.3 成本优势

盐穴储油库建设的经济与时间成本低。主要体现在 4 方面：① 盐穴储油库位于地下数百米到一千多米，温度和压力条件与石油原始赋存环境接近；② 天然地温梯度有利于促进石油在储库内部流动，油品不易变质；③ 地下盐穴储库围岩和井口密闭性极好，可防止油气挥发外泄，储存过程中几乎没有损耗；④ 盐穴储油库建设速度快，特别是利用盐矿已有采空区建库，可节省大量建库经济成本和时间成本。盐矿采空区改建储油库涉及的主要工作量为老井改造，保守估计 6 个月内可以完成 1 组体积数十万立方米的盐穴储油库建设工作。此外，盐穴储油库群由多个独立的盐穴组成，若部署多个施工单位分别针对不同盐穴同时作业，6 个月内就可以建成百万方级别的储备能力，这对于建设大规模地下石油储库非常有利。例如，美国建设地面油库成本为 15—18 美元/桶，开凿

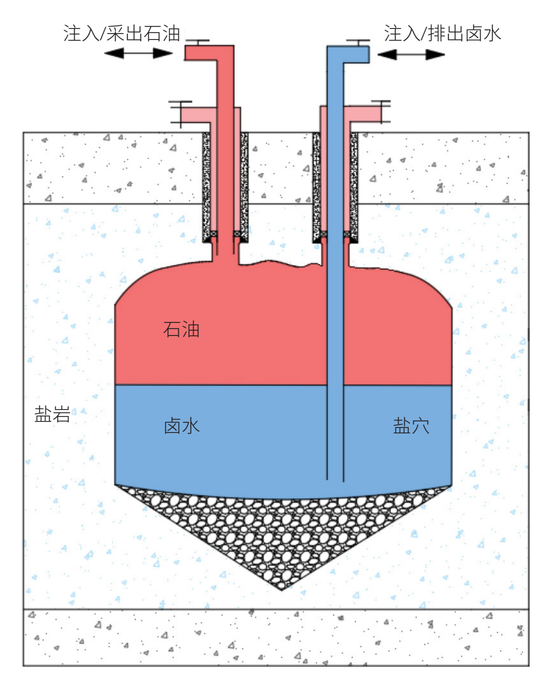


图 4　盐穴储油技术示意图

Figure 4　Schematic diagram of salt cavern oil storage technology

表1　不同储油方式的对比

Table 1　Comparison of different oil storage methods

石油储备方式	建造地点	优势	局限性	适用范围	实物图片[4]
地上油罐	地面	结构简单，容易建造	占地面积大，容易泄露，风险高	内陆炼油厂	
半地上油罐	地上和地下	结构较简单，容易建造	占地面积大，容易泄露，风险较高	内陆炼油厂、沿海储油库	
海上储罐	海上	结构简单，容易建造，占地面积小	容易泄露，风险较高	沿江炼油厂	
地下岩洞	地下岩洞	封闭性好，不易破坏，不易渗漏，风险较低	建造周期较长，依赖特有地质条件（在花岗岩等浅部建造岩洞）	具有良好地下岩洞位置	
地下盐穴	地下盐岩层内	封闭性好，不易破坏，不易渗漏，风险低	建造周期长，依赖特有地质条件（需在深部地下盐矿建）	具有良好盐岩地层位置	

山体岩洞储油成本为30美元/桶，而建设地下盐穴储油库成本仅为1.5美元/桶[2]。

1.4 防御优势

盐穴储油库的抗打击能力极强。目前，最先进的钻地弹打击深度约为200米[5]，而盐穴储油库一般建造在数百至一千多米深的地下盐矿，油库埋深不仅远大于打击深度距离，并且深埋地下的油库也不具备燃爆条件。因此，盐穴储油库遭受恐怖袭击和战争武器破坏的可能性极低，而地面储油库、半地上储油库等其他形式的储油库由于主体工程暴露在地表，极易遭受战争和武器的威胁。

2 国外石油储备现状及我国存在的问题

战略石油储备制度起源于1973年中东战争时期，当时欧佩克（OPEC）石油生产国对发达国家进行石油禁运，促使发达国家成立国际能源署（IEA），提出建立战略石油储备。战略石油储备可以控制国家石油的进口量和进口价格，对国家能源供应安全具有重要的保障作用（图5）[6]。

2.1 国外战略石油储备现状

地下盐穴存储石油具有安全性高、性价比高和注采便捷等突出优势，是国际上石油战略储备的首选方式。美国、法国、德国、俄罗斯、加拿大等多个发达国家相继建造了规模巨大的盐穴储油库。

2.1.1 美国

美国战略石油储备大部分在地下盐穴，主要集中在得克萨斯州和路易斯安州的墨西哥湾沿岸地区（图6）[7]，包括：得克萨斯州 Bryan Mound（3.5×10^7

立方米）和 Big Hill（2.5×10^{7}立方米）基地，路易斯安州 West Hackberry（3.5×10^{7}立方米）、Bayou Choctaw（1.2×10^{7}立方米）和 Weeks Island（1.1×10^{6}立方米）基地。每个储备基地都由数量不等的盐穴组成，这些盐穴储库的腔体高约 250 米、直径约 70 米。截至目前，美国现有盐穴储油库的总存储能力 1.1×10^{8}立方米（表 2）[7]。

2.1.2 德国

德国的原油主要储存在下萨克森州 1 000—1 500 米深的盐矿中。石油按地域和需求的原则分别储存在各个联邦州的地盘上。德国地下储备库大致从北到南都有分布，西北部地区较多，绝大部分盐穴储备库用来储存原油（表 3）[8]。德国主要的 4 个盐穴储油基地共有 58 个溶腔，总储存能力 1.0×10^{7} 立方米[8]。

2.1.3 法国

法国是世界上最早建立企业石油储备制度的国家。与美国和德国不同，法国的战略石油储备并非集中于原油，也包括车用汽油、航空煤油、柴油、照明煤油、家用燃油、喷气发动机燃油、重油（表4）[9]。法国的 Manosque 盐穴储备库位于法国东南马赛附近的 Manosque 小镇，建有 28 个盐穴，储存规模达 8.17×10^{6} 立方米，占法国国家战略储备的 40%。同时，法国的 Tersanne 盐穴储备库和 Etrez 盐穴储备库分别于 1968 年和 1977 年开始建设，其中 Tersanne 计划建造 14 口盐穴，Etrez 计划建造 28 口盐穴，预计二者形成盐穴体积共 2×10^{5} 立方米[9]。

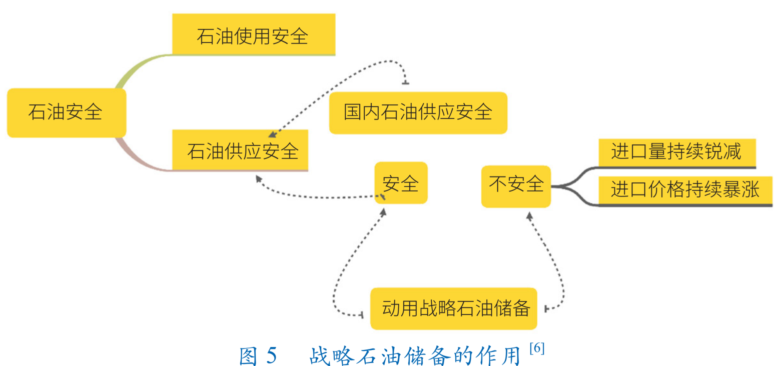


图 5　战略石油储备的作用[6]
Figure 5　Role of strategic oil storage[6]

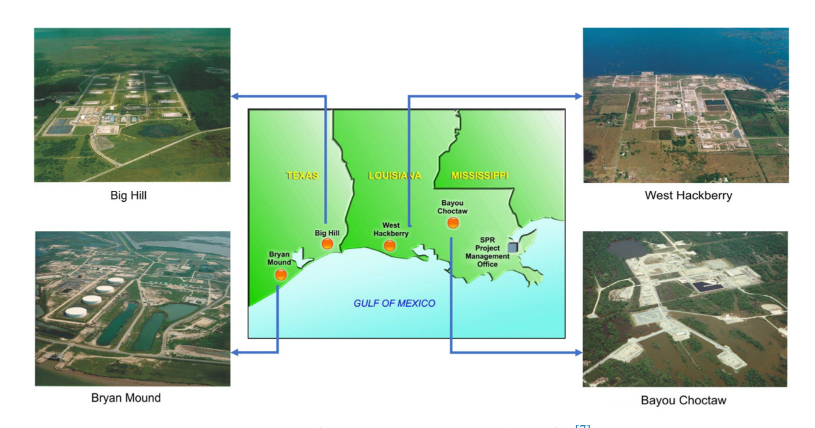


图 6　美国战略石油储备库分布[7]
Figure 6　Distribution of U.S. strategic oil storage[7]

表 2　美国战略储油名称及储存能力[7]
Table 2　U.S. strategic oil storage names and storage capacity[7]

储油库名称	位置	占地面积（$\times10^{6}$平方米）	储存能力（$\times10^{8}$立方米）	石油类型（$\times10^{8}$立方米）		
				含硫油	低硫油	墨西哥玛雅油
Bryan Mound	得克萨斯州弗里波特市	2.00	0.36	0.24	0.10	0.02
West Hackberry	路易斯安那州莱克查尔斯西南	2.30	0.35	0.17	0.18	/
Big Hill	得克萨斯州杰斐逊城	1.10	0.25	0.14	0.08	/
Bayou Choctaw	路易斯安那州巴吞鲁日	1.40	0.12	0.08	0.04	/
Weeks Island	路易斯安那州新奥尔良西南	0.03	0.11	/	/	/

表 3　德国盐穴储油库基本情况[8]

Table 3　Basic information of salt cavern oil storage in Germany[8]

储油库名称	盐穴个数	储备类型	备注
Heide	9	原油、成品油	战略储备
Rüstringen	35	原油、成品油	战略储备
Sottorf	9	原油、成品油	战略储备
Lesum	5	轻质燃料	战略储备
Etzel	/	原油、成品油	/
Blexen	/	原油/柴油/汽油	/
Hulsen	/	原油、成品油	废弃矿井

表 4　法国盐穴储油情况[9]

Table 4　Salt cavern oil storage in France[9]

储油库名称	储备类型	体积（立方米）
Lesum	成品油	1.2×10^6
Maroc	成品油	1.4×10^7
Blexen	成品油	3.0×10^6
Itsle	成品油	1.2×10^5

2.2 我国战略石油储备现状

2003 年，我国批准建立储备能力高达 6.8×10^7 吨的石油储备计划，分为 3 期完成，储备能力分别为 1.2×10^7 吨、2.8×10^7 吨与 2.8×10^7 吨。目前，国家石油储备任务第 1 期、第 2 期已完成，第 3 期正在筹建，第 3 期石油储备提出要通过盐穴建立大规模石油储备库。目前，我国已建成舟山、舟山扩建、镇海、大连、黄岛、独山子、兰州、天津及黄岛国家石油储备洞库共 9 个国家石油储备基地（图 7）[10]。储备方式多数采用地面储罐，部分采用地下水封洞库。据国家统计局公开的最新数据，截至 2017 年，国家石油储备基地以及部分社会企业共储备 3.7×10^7 吨石油。

2.3 我国战略石油储备存在的问题

2.3.1 储备量严重不足

随着我国石油需求的增长，对石油的进口依赖日益增强，2019—2021 年，我国石油对外依存度已连续 3 年超过 70%。国际能源署要求其成员至少储备相当于 90 天净进口量的石油，而实际上发达国家的石油储备都远大于该要求。例如，日本的石油储备量相当于 200 天石油净进口量，美国石油储备量相当于 150 天石油净进口量，而我国战略石油储备量仅相当于 32 天的石油净进口量（图 8）[3]。

2.3.2 建设和运营成本高

我国原油地面储罐采用高强度钢板制造，建库成本约为 1 000 元/立方米，运营过程中需要通过加热方式保持储存温度。我国地下水封洞库通过人工开挖方式建造，建库成本约为 760 元人民币/立方米，运营过程中需要人为创造水幕密封。而美国盐穴型战略石油储备库的建库成本仅为 1.5 美元/桶，折合人民币仅有约 63 元/立方米[2]。对比看出，我国储油设施的建设和运营成本高昂。



图 7　中国战略石油储备分布[10]

Figure 7　Distribution of China's strategic oil storage[10]

2.3.3 抗打击能力弱

国家石油储备基地第 1 期全部采用地面储罐，且主要分布在东部沿海经济发达地区，这类储油库是恐怖袭击或战争打击的重点目标。国家石油储备基地第 2 期，部分采用了地下水封洞库，油库位于地下数十米，但这类地下储油库仍是潜在打击目标。因此，在国际环境的不确定因素下，我国第 1 期、第 2 期石油储备可能面临诸多外部环境的挑战和干扰。

3 我国盐穴储油的条件

3.1 石油输运管道发达

我国已建成密集且完备的石油输运管道。2004 年，我国开展石油储备论证工作时，国家石油输运管道里程短，因此只能考虑在方便油轮停靠的沿海地区建库。随着我国油气管网的快速建成，石油输运管道已不是制约性问题。2007—2021 年，我国原油管道由 1.7×10^4 千米增加到 3.1×10^4 千米，成品油管道由 1.2×10^4 千米增加到 3.0×10^4 千米。据调研，我国中东部地区盐矿 100 千米范围内都能找到多条输油管道[11]。

3.2 建库技术储备充足

国家能源局原局长张国宝[12,13]论证发现，在开展国家石油储备论证工作时，由于考虑到地下盐矿距离沿海较远，盐层厚度欠佳与卤水处理难解决等问题，未能采纳盐穴储油库方案。目前，经过近 20 年的努力，随着国家基础设施的完善，国家铺设管线水平不断提高、盐化工卤水消化能力不断提升、盐穴储气库建设技术不断进步，盐穴战略储油的相关问题得以解决。

近年来，我国科研人员就盐穴储油技术进行了可行性论证，为盐穴储油的实施创造了良好的基础研究环境。① 盐穴储油的设计方面。储油库的选址、储油库的区域构造、地层沉积、盖层密封性等地质条件，油卤的传热过程，盐穴的设计和稳定性，溶腔的密封性，以及造腔控制等设计是作为盐穴储油设计的关键点[14-17]。② 盐穴储油的建造方面。盐穴的顶板保护技术、造腔的管柱工艺、采卤管柱解堵等工艺是盐穴实际建造过程中出现的难题。同时，钻完井的井身结构、钻井液的选择与相关的地面系统技术也是作为储油库建造过程中的重要部分[18-20]。③ 盐穴储油的运行评价方面。设计合理的注采运行速率和注采方案可以保证盐穴储油库平稳运行。此外，储油库运行过程中的蠕变和热交换、运行过程的溶腔力学特点、储油运行过程的稳定性评价也是作为储油库安全运行的重要部分[21-25]。

3.3 建库工程经验丰富

盐穴储气库工程实践为储油库建设打下了坚实基础，利用盐穴储存石油和天然气具有很多相似点。西气东输金坛盐穴储气库工程已于2007年投产储气，至今运行安全稳定；川气东送金坛盐穴储气库和江汉盐穴储气库工程也已注气投产。目前，已投产的40多口盐穴储气库，总体积近 1.5×10^7 立方米。另外，江苏淮安盐矿、湖北云应盐矿、河南平顶山盐矿、山东泰安盐矿、河北宁晋盐矿等地的盐穴储气库工程，也已进入可行性论证及先导试验阶段，我国正在迎来盐穴储气库建设的高潮（图 9）。这些工程实践证明了我

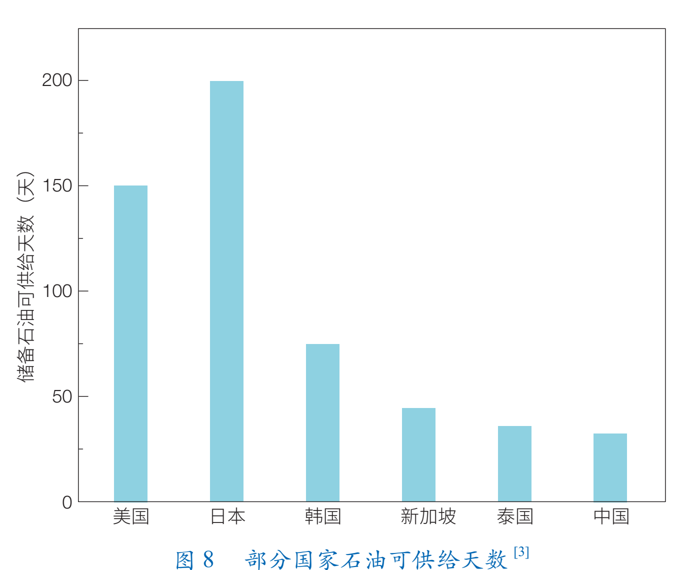


图 8　部分国家石油可供给天数[3]
Figure 8　Days of oil availability by country[3]

国盐穴型油气储备的可行性，也为我国在深部盐岩实施战略石油储备积累工程经验。

利用已有盐穴改建储油库可以充分借鉴盐矿采空区改建储气库技术。中国石油天然气集团有限公司（以下简称“中国石油”）和中国科学院武汉岩土力学研究所（以下简称“中科院岩土所”）等单位联合开展科技攻关，提出利用已有溶腔改建盐穴储气库，建立了盐矿采空区可用性筛选标准和评价方法，形成了盐矿老井封堵和改造技术方法；该方法成功应用于江苏金坛盐矿采空区改建储气库工程，共建成 5 口储气库并安全平稳运行 15 年，这为已有盐穴改建储油库建设提供技术优势。

针对盐穴地下储气库发展的若干关键科技问题，中科院岩土所等科研单位，联合中国石油和中国石油化工股份有限公司（以下简称“中国石化”）等工程建设单位，针对层状盐岩构造的特殊赋存条件，开展了储库盐矿地层精细探测、储库稳定性及密闭性、储库水溶建造技术、密集储库群灾变演化和风险评估等方面的基础研究，为我国油气地下储备的选址、设计、施工及运营提供了关键技术支撑，并已在前期开展的盐穴储气库工程建设中得到成功应用，形成了盐穴储气库技术规范体系，主要包括：《盐穴地下储气库安全技术规程》（SY/T 6806—2019）、《储气库术语》（SY/T 7642—2021）、《储气库选址评价推荐做法》（SY/T 7643—2021）、《盐穴型储气库井筒及盐穴密封性检测技术规范》（SY/T 7644—2021）、《盐穴稳定性检测与评价技术要求》（SY/T 7646—2021）、《盐穴储气库造腔井下作业规范》（SY/T 7650—2021）、《盐穴储气库造腔技术规范》（Q/SY 1417—2011）、《盐穴储气库腔体设计规范》（Q/SY 1416—2011）。



图 9　中国在建或拟建的盐穴储气库

Figure 9　Salt cavern gas storage under construction or proposed in China

3.4 盐矿地质资源充足

利用盐矿采空区可以快速改建盐穴储油库，这对于盐穴储油库的建设非常有利。我国盐矿分布范围广，盐矿地下采空区保有量大，井矿盐开采规模世界第一（图 10）[26]。2014 年，全国井矿盐产量已高达 4.8×10^7 吨，根据这一数据估算每年可产生采空区约 2.0×10^7 立方米。进一步估算，盐矿开采在近 10 年已形成超过 3.0×10^8 立方米的采空区，这将会为改建盐穴储油库创造巨大的潜力。

4 加快建设盐穴型战略石油储备的建议

4.1 普查全国盐矿采空区，筛选出有利建库区块

地下盐穴储油在我国暂无先例，建议进一步筛选适合建设地下储油库的备选盐矿。筛选盐穴储油库是基础条件，建议由国家粮食和物资储备局与自然资源部牵头，联合中国石油、中国石化、中国盐业集团有限公司和江苏省盐业集团有限责任公司等相关建设主体，与中国科学院等科研机构、高校，开展前期工作、组建工作专班、深入开展研究论证，在有关盐矿



图 10　中国盐矿分布图[26]

Figure 10　Distribution map of salt mines in China[26]

开展水溶建腔和压腔实验，用试验的方法直接论证我国盐矿中建造地下储油库的可行性，以取得可靠的数据支持，力争有若干盐矿进入国家战略石油储备。具体主要攻关方向分为以下 3 点：① 政策引导。建立筛选标准，并形成相应的政策文件，引导盐穴储油库科学、有序、合理筛选。② 技术研发。研发低成本简便腔体探测与构建方法，其中，声呐探测是腔体测量的常用手段。③ 政府助力。调动各地国土资源部门积极作为，着重发挥其在资源审批的主导地位。

4.2 研发盐穴储油库成套建库技术，推动盐矿采空区资源化利用

盐穴储油库水溶造腔技术是储油库建设的核心环节，与盐矿水溶开采技术存在一定联系，但由于两者技术目标不同，所以存在较大差异。因此，需要在传统盐矿开采技术的基础上进行技术革新，研发出以采空区资源化利用为目标的采卤造腔建库技术。① 研发盐矿采空区改建储油库技术。我国盐矿采空区保有量巨大，具备短期内建成大规模储油库的基本条件，建议提前做好工程可研和设计、仓储运输服务等规划，充分协调内陆码头、输油管道及油罐车运输路线，加大力度研发盐矿采空区改建储油库技术，形成战略石油盐穴储备库的设计和施工方法。② 研发盐矿采卤与储库造腔一体化技术。建议根据不同地区盐矿地质特点，在盐矿开采井设计过程中对溶腔资源化利用予以考虑，以建造稳定性和密封性优良的溶腔为主要目标，尽快总结并研发出“以盐矿采卤为辅、以储库造腔为主”的水溶法采卤造腔技术体系，实现盐矿采卤与储库造腔一体化同步开展，尽可能促使更多的采卤溶腔用于建库，从而充分利用丰富的地下盐矿资源。③ 制定盐矿水溶开采的国家或行业标准。在盐穴储油领域没有国家或行业标准，盐矿水溶开采设计与施工主要依靠经验，致使储油库建设风险大大增加，建议由政府牵头制定盐矿开采技术规范，根据矿区不同区域的地质特征，合理布设井位和制定开采工艺，防止无序过度开采，引导溶腔向有利于后期建库利用的方向发展。④ 制定盐矿开采与综合利用的长期规划。建议政府牵头开展地区盐矿地质情况详细摸排，优选出适宜建库的优良区块，提早规划盐矿地下溶腔建造方法及其用途，短期内为天然气储库建设，中长期为石油储库、压缩空气储能库和氢气储库等重要能源设施建设，提供必要的基础资料和优良的场址。

4.3 出台国家石油储备法规和政策，调动建库主体的积极性

美国、欧洲、日本都有完备的石油储备法律法规，并且是法律、法规先行。西方国家通过法律对战略石油储备的建设、购买、动用、轮换、资金来源和使用、管理和监管、处罚等一系列事项进行规范，再依法进行石油储备建设。如果缺乏石油储备法律法规，各方会瞻前顾后，责任和义务没有落实，企业积极性难以调动，监管也不会到位。

通过参照德国《原油和石油产品储备法》，加强石油储备法的筹备和建设工作，为开展我国盐穴石油战略储备第3期工程做好法律方面的保驾护航。从而建设完备的盐穴储油法律体系，为下一步盐穴储油工作开展奠定基础。① 明确盐矿采空区归属权。按照土地市场挂牌后形成的房地产产权70年使用权加以类比[27]，矿产资源的地下空间使用权也应归企业所有，不同点在于地上空间与地下空间分别加以利用。在后续的综合利用中，企业要通过不断投入资金和技术创新，加强监测监控手段，全面确保地面和地下空间使用安全。需要注意的是，能够开采地下盐岩和储存油气的企业主力为国有企业，其本身资产就属国家所有。假设国家出台相关政策强制对地下空间使用权加以管理的话，由于技术的复杂性和投入巨大等因素，只有国有企业才能扛得起社会责任，同时为国创利、为民造福。② 鼓励民营储备，藏油于民。鼓励民营资本投入储能事业。目前，民营企业海南华信公司已在海南洋浦建设了 3.0×10^6 立方米的民营储备库，开创了民营企业参与储能的先河，这样有利于民营企业主动积极参与盐穴储油，为国家盐穴石油储备发展增添新的活力。2019年，《中共中央 国务院关于营造更好发展环境支持民营企业改革发展的意见》明确支持民营企业进入油气勘探开发领域[28]。同时，要全面开放油气勘查探采市场，鼓励石油天然气勘探开发向民企敞开大门，从而形成国家石油储备为主体，多种经济成分参与的油气勘查开采与储备的市场格局。③ 简化审批程序，抢抓低价储备窗口。国务院下发的简政放权政策应该在盐穴储油建设中充分落实，从而帮助企业抢抓低价储备窗口期，保证油品储备的上层供应链完整。国际油价瞬息万变，不应由于审批流程而白白错过黄金储备机遇期。财政部、国家能源局、自然资源部等上层决策层面和相关部门应联合中国石油、中国石化等相关单位，建立长期有效的对话机制，协商沟通，不断优化审批程序。2015年，国家发展和改革委员会、商务部分别下发《国家发展改革委关于进口原油使用管理有关问题的通知》《商务部关于原油加工企业申请非国营贸易进口资格有关工作的通知》，对进口原油使用权和原油进口权放开。这使得油气改革的“破垄断”开始提速[28]，我国石油市场格局发生了重大转变，进口原油企业由原来5家国企变成超20家国企和民企的竞争格局，形成多元的原油进口队伍。从而保证在油价下跌的战略机遇期内，企业能够及时抢抓石油低价储备窗口，使得低价原油可以买进来并存进去，从而在源头上解决国家原油储备少的难题。④ 改革油气管网运营机制，搭建交易平台。2019年3月，中央全面深化改革委员会第七次会议审议通过《石油天然气管网运营机制改革实施意见》，组建国有资本控股、投资主体多元化的石油天然气管网公司，推动形成上游油气资源多主体多渠道供应、中间统一管网高效集输、下游销售市场充分竞争的油气市场体系，提高油气资源配置效率，保障油气安全稳定供应。要搭建油气交易平台，上海国际能源交易中心已经上市了我国第1个国际化期货品种，即上海原油（SC）期货，这可以充分发挥市场在原油配置中的决定性作用，从而提高我国在国际石油定价的话语权，保障国家的能源安全。

5 结论

盐穴储油相比于其他方式储油的优势明显，具有成本造价低、安全、高效、规模大等突出特点，在地下储油方面具有得天独厚的优势条件。相比于国外盐穴战略石油储备而言，我国战略石油储备严重不足，在百年未有之大变局下，通过盐穴建立大规模地下石油储备是改善国家能源储备现状的必经之路，也是保障国民经济和社会发展的“压舱石”。盐穴储油及相关辅助配套技术已经成熟，具备在国内建造首座盐穴储油库的理论条件和现实条件，通过改造盐矿已有采卤溶腔和采用采卤与储库溶腔一体化技术能够极大

地提高储油库建设速度。同时，盐穴储油立法、行政审批、国家或行业标准、储备基地选址等相关进程需要相关部门给予政策和法律支持，使得相关工作能够尽快落实，从而为我国盐穴战略石油储备建设奠定基础。

参考文献

1 Zheng X, Jun F, Gang C. Progress and prospects of oil and gas production engineering technology in China. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(3): 644-659.

2 李银平, 施锡林, 杨春和. 充分利用盐穴群建设大规模石油储备库. 中国能源报, 2015-06-01(03).
Li Y P, Shi X L, Yang C H. Making full use of the salt cavern cluster to build a large-scale oil storage. China Energy News, 2015-06-01(03). (in Chinese)

3 Tsvetkova A. World experience of strategic reserves mineral// Proceedings of 3rd International Conference on Management–Economics–Ethics–Technology (MEET 2017). Poland: Wydawnictwo Politechniki Śląskie, 2017: 55-64.

4 陈海涛. 基于供应链的中国石油资源安全保障研究. 长沙: 中南大学, 2011.
Chen H T. Study on China's Oil Resource Security Based on Supply Chain. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)

5 康琳. "地堡杀手"钻地弹. 科学大众（中学生）, 2019, (10): 46-48.
Kang L. "Bunker buster" drill bombs. Science Popular (Middle School), 2019, (10): 46-48. (in Chinese)

6 张栋杰. 中国战略石油储备研究. 武汉: 武汉大学, 2014.
Zhang D J. Research on China's Strategic Oil Storage. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)

7 Leiby P N, Bowman D. The Value of Expanding the U.S. Strategic Petroleum Reserve, ORNL/TM-2000/179. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 2000.

8 Langer M. Use of solution-mined caverns in salt for oil and gas storage and toxic waste disposal in Germany. Engineering Geology, 1993, 35(3-4): 183-190.

9 Davis R M. National strategic petroleum reserve. Science, 1981, 213: 618-622.

10 Wu G, Wei Y M, Nielsen C. A dynamic programming model of China's strategic oil reserve: General strategy and the effect of emergencies. Energy Economics, 2012, 34(4): 1234-1243.

11 高鹏. 2021年中国油气管道建设新进展. 国际石油经济, 2022, 30(3): 12-19.
Gao P. New progress of oil and gas pipeline construction in China in 2021. International Oil Economics, 2022, 30(3): 12-19. (in Chinese)

12 张国宝. 国家战略石油储备：一个英明且及时的决策（下）. 中国经济周刊, 2017, (16): 81-83.
Zhang G B. National strategic oil storage: A wise and timely decision (II). China Economic Weekly, 2017, (16): 81-83. (in Chinese)

13 张国宝. 国家战略石油储备：一个英明且及时的决策（上）. 中国经济周刊, 2017, (15): 78-81.
Zhang G B. National strategic oil storage: A wise and timely decision (I). China Economic Weekly, 2017, (15): 78-81. (in Chinese)

14 Shi X L, Liu W, Chen J. Geological feasibility of underground oil storage in Jintan Salt Mine of China. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 3159152.

15 Niu C K, Tan Y F, Li J N. Model validation and stability analysis for operation projects in Jintan Salt Cavern for strategic oil storage of China. Journal of Oil Science and Engineering, 2015, 127: 44-52.

16 丁国生, 谢萍. 利用地下盐穴实施战略石油储备. 油气储运, 2006, 25(12): 16-19.
Ding G S, Xie P. Implementation of strategic oil storage using underground salt caverns. Oil and Gas Storage and Transportation, 2006, 25(12): 16-19. (in Chinese)

17 黄耀琴, 陈李江. 地下盐穴储油库库址优选. 油气储运, 2011, 30(2): 117-120.
Huang Y Q, Chen L J. Preferred site selection for underground salt cavern oil storage. Oil and Gas Storage and Transportation, 2011, 30(2): 117-120. (in Chinese)

18 李建中. 石油战略储备的新领域——地下盐穴储库. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S2): 4787-4789.
Li J Z. A new field of strategic oil reserves—Subsurface salt

cavern reservoirs. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S2): 4787-4789. (in Chinese)

19 张浩, 程旺林. 盐穴储油库采卤管柱解堵工艺研究. 内蒙古石油化工, 2016, 42(Z2): 28-30.
Zhang H, Cheng W L. Research on unblocking process of brine extraction column in salt cavern storage reservoir. Inner Mongolia Petrochemical, 2016, 42(Z2): 28-30. (in Chinese)

20 李文阳, 丁国生. 我国石油资源地下储备的可行性. 石油化工技术经济, 2002, 17(1): 14-18.
Li W Y, Ding G S. The feasibility of underground reserves of oil resources in China. Petrochemical Technology and Economy, 2002, 17(1): 14-18. (in Chinese)

21 牛传凯, 谭羽非, 宋传亮. 盐穴型战略储油库参数选择及稳定性分析. 油气储运, 2013, 32(11): 1217-1222.
Niu C K, Tan Y F, Song C L. Parameter selection and stability analysis of strategic oil storage in salt caverns. Oil and Gas Storage and Transportation, 2013, 32(11): 1217-1222. (in Chinese)

22 卜宪标, 谭羽非, 李炳熙. 盐穴地下储油库热质交换及蠕变. 西安交通大学学报, 2009, 43(11): 104-108.
Bu X B, Tan Y F, Li B X. Heat exchange and creep in a salt cavern underground reservoir. Journal of Xi’an Jiaotong University, 2009, 43(11): 104-108. (in Chinese)

23 牛传凯, 谭羽非, 宋传亮. 盐穴战略储油库注采运行方案的优化分析. 西安交通大学学报, 2014, 48(3): 72-78.
Niu C K, Tan Y F, Song C L. Optimization analysis of strategic reservoir injection and extraction operation scheme in salt caverns. Journal of Xi’an Jiaotong University, 2014, 48(3): 72-78. (in Chinese)

24 吴文, 杨春和, 侯正猛. 盐岩中能源（石油和天然气）地下储存力学问题研究现状及其发展. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5561-5568.
Wu W, Yang C H, Hou Z M. Current status and development of research on the mechanics of subsurface storage of energy (oil and gas) in salt rocks. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5561-5568. (in Chinese)

25 王同涛, 杨春和, 安国印, 等. 盐穴储油库稳定性评价方法: 中国, CN110096824A. 2019-08-06.
Wang T T, Yang C H, An G Y, et al. Stability evaluation method for salt cavern oil storage: China, CN110096824A. 2019-08-06. (in Chinese)

26 宣之强. 中国盐矿资源与盐化工区研究. 盐湖研究, 1996, 4(3-4): 69-72.
Xuan Z Q. Research on salt resources and salt chemical zones in China. Salt Lake Research, 1996, 4(3-4): 69-72. (in Chinese)

27 张广婷. 房屋70年“大限”后土地使用权问题. 上海房地, 2016, (9): 32-34.
Zhang G T. Land use rights after the 70-year “limit” of housing. Shanghai Real Estate, 2016, (9): 32-34. (in Chinese)

Problems and Countermeasures for Construction of China's Salt Cavern Type Strategic Oil Storage

SHI Xilin[1,2] WEI Xinxing[1,2] YANG Chunhe[1,2] MA Hongling[1,2] LI Yinping[1,2,3*]
(1 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2 School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 Hubei Key Laboratory of Geo-environmental Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract Oil is an important strategic energy source, and the establishment of sufficient oil storage is a major need to ensure the political, economic and national defense security of the country. China's outer dependence for oil has exceeded 70% for three consecutive years, but the oil storage is extremely low. Underground salt caverns are internationally recognized as excellent places for large-scale oil storage, developed countries in Europe and the United States have built several salt cavern oil storages in the last century. The construction of salt cavern oil storage is expected to become an effective way to solve China's oil crisis. This study investigates the current situation of foreign salt cavern oil storage, reveals the problems of China's strategic oil storage, analyzes the advantageous conditions of China's salt cavern oil storage in terms of technology, resources, and transportation, and puts forward suggestions for building salt cavern-type strategic oil storage in China. The study shows that China has developed oil transportation pipelines, adequate of salt cavern oil storage, rich engineering experience, and sufficient geological resources of salt mine required for storage construction. China can build a large-scale salt cavern-type strategic oil storage in a short period of time.

Keywords energy, strategy oil, salt cavern oil storage, problems, countermeasures

施锡林 中国科学院武汉岩土力学研究所研究员。主要研究方向为深部盐岩能源地下储备。E-mail: xlshi@whrsm.ac.cn

SHI Xilin Professor of Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is underground energy storage in deep salt formation. E-mail: xlshi@whrsm.ac.cn

李银平 中国科学院武汉岩土力学研究所环境岩土工程湖北省重点实验室主任、研究员。主要研究领域为深部地下能源储备。E-mail: ypli@whrsm.ac.cn

LI Yinping Professor of Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Director of Hubei Key Laboratory of Geo-environmental Engineering. His main research interest is underground energy storage in deep salt formation. E-mail: ypli@whrsm.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author